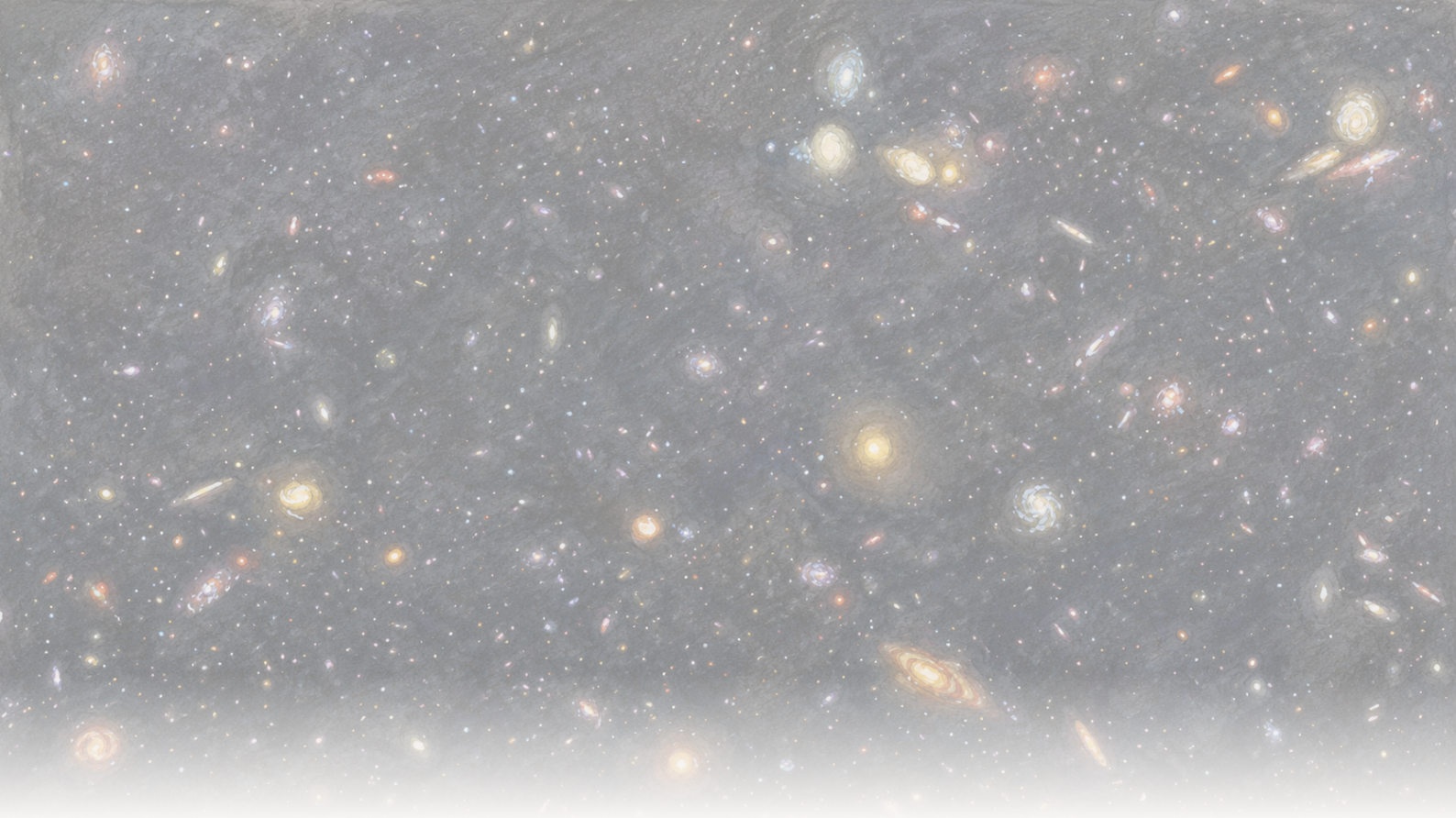


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Tolimiausia iki šiol galaktika, iš kurios tiesiogiai pagauta ištrūkstanti jonizuojanti šviesa

Hubble ir JWST leido astronomams tiesiogiai aptikti jonizuojančią ultravioletinę spinduliuotę, ištrūkstančią iš vienos galaktikos maždaug 250 mln. metų po kosminės rejonizacijos pabaigos – tai tolimiausias toks tiesioginis „nutekėjimas“. Dažniausiai cituojama 50–100 % ištrūkimo dalis yra pagrįsta duomenimis, bet rekonstruota modeliais, o ne tiesiogiai išmatuota. Tylesnis rezultatas – pirmas tokio didelio raudonojo poslinkio bandymas patikrinti, kaip atpažinti ištrūkimą netiesiogiai tada, kai jo tiesiogiai nebebus galima matyti.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Cinzia Vaglio and Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

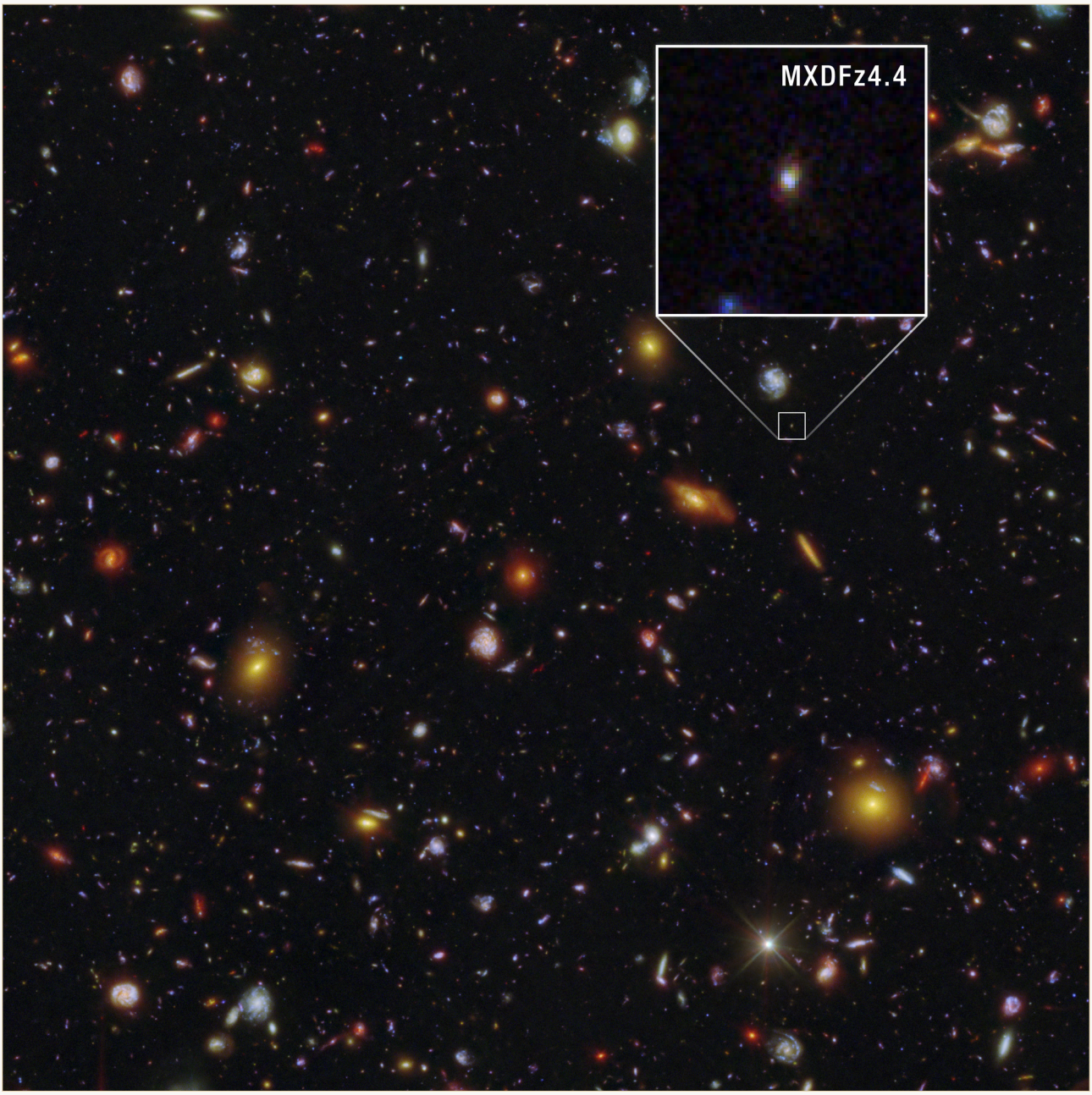
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M. Koekemoer, Mitchell Revalski, Matthew J. Hayes, Claudia Scarlata, Ray A. Lucas, Norman A. Grogin, David V. Stark, Paolo Sun, Nor Pirzkal, and Louis-Gregory Strolger, The Astrophysical Journal (accepted, 2026) · DOI: 10.3847/1538-4357/ae75b0

Šviesa, kuri išsklaidė kosminį rūką

Pirmuosius kelis šimtus milijonų metų Visata buvo nepermatoma. Erdvę užpildė neutralus vandenilis – atomai, prie kurių elektronai dar buvo prisijungę – o neutralus vandenilis labai gerai sugeria *jonizuojančią* ultravioletinę spinduliuotę: trumpesnių nei 912 angstremų bangų ilgių šviesą (žemiau vadinamosios *Lymano ribos*), turinčią pakankamai energijos išmušti elektroną iš vandenilio atomo. Ne visa ultravioletinė šviesa tai gali – ilgesnių bangų UV sugeriamas kitaip ir jo iš ankstyvųjų galaktikų matome daug. Taigi jauna Visata sulaikė būtent jonizuojančią spinduliuotę. Per kitą maždaug milijardą metų kažkas pripildė kosmosą pakankamu tokių fotonų kiekiu, kad vandenilio elektronai vėl būtų atplėšti: dujos jonizavosi, o šviesa galėjo keliauti laisviau. Astronomai šį laikotarpį vadina rejonizacijos epocha, o akivaizdžiausi įtariamieji yra pirmosios galaktikos. Jų karštos ir trumpaamžės žvaigždės skleidžia daug jonizuojančios ultravioletinės šviesos; jei pakankama jos dalis ištrūko į tarpgalaktinę erdvę, jos galėjo atlikti didžiąją šio darbo dalį.

Problema slypi žodyje *ištrūko*. Didžioji galaktikos jonizuojančios šviesos dalis niekada jos nepalieka – ją sugeria tas pats galaktikos vandenilis. Tik tam tikra dalis patenka į tarpgalaktinę erdvę, o ši dalis, vadinama *ištrūkimo dalimi* (*escape fraction*), yra vienas sunkiausiai nustatomų visos istorijos dydžių. Dar blogiau: pačios rejonizacijos metu nutekėjusią šviesą beveik neįmanoma tiesiogiai aptikti, nes tarpgalaktinis neutralus vandenilis, kurį ši spinduliuotė padeda jonizuoti, ją sugeria gerokai anksčiau, nei ji mus pasiekia. Todėl norėdami suprasti ištrūkimo mechanizmą astronomai turi žiūrėti į galaktikas šiek tiek *po* rejonizacijos – pakankamai artimas epochai, kad jos būtų prasmingi analogai.

Ilias Goovaerts vadovaujama komanda dabar aptiko tokį nuotėkį beveik tolimiausioje vietoje, kur jis kada nors matytas. Naudodami gilius Hubble ir JWST vaizdus, tyrėjai praneša apie vieną blyškią galaktiką MXDFz4.4, kurios ištrūkstanti jonizuojanti ultravioletinė šviesa viename Hubble filtre matoma kaip silpnas šviesos lopinėlis. Galaktikos raudonasis poslinkis yra 4,442, tad ją matome maždaug 250 mln. metų po rejonizacijos pabaigos. Tai tolimiausia iki šiol tiesiogiai aptikta tokio tipo „spinduliuotės praleidėja“.



MXDFz4.4 (padidinta įklijoje) šiame giliame Hubble ir JWST lauke atrodo kaip blyškus lopinėlis. Tai tolimiausia galaktika, iš kurios tiesiogiai aptikta ištrūkstanti jonizuojanti ultravioletinė spinduliuotė; ją matome praėjus maždaug 250 mln. metų po kosminės rejonizacijos pabaigos.

NASA, ESA, CSA, STScI, Ilias Goovaerts (STScI), Marc Rafelski (STScI, JHU), Anton Koekemoer (STScI); Image Processing: Alyssa Pagan (STScI) CC BY 4.0

Skaičius, kuris greičiausiai bus cituojamas iš šio darbo, yra ištrūkimo dalis, ir ji didelė – nuo maždaug pusės iki beveik visos galaktikos pagaminamos jonizuojančios šviesos. Skaičius pagrįstas duomenimis, tačiau svarbu tiksliai suprasti, ką tai reiškia. Jis nėra tiesiogiai nuskaitytas iš vaizdo; jis atkurtas per modelių grandinę, o platus intervalas turi sąžiningą priežastį. Naudingesnė istorija susideda iš dviejų dalių: ką vienas tiesiogiai pagautas nuotėkis gali ir ko negali pasakyti, ir tylesnio antro rezultato – pirmojo tokio didelio raudonojo poslinkio bandymo patikrinti netiesioginį nuotėkio požymį ten, kur tiesioginis metodas dar vos veikia.

Kas yra „ištrūkimo dalis“ ir kodėl ją taip sunku nustatyti?

Žvaigždės – ypač didžiausios, karščiausios ir jauniausios – skleidžia ultravioletinius fotonus, turinčius pakankamai energijos išmušti elektronus iš vandenilio atomų. Astronomai tai vadina jonizuojančia spinduliuote, o atitinkamą spektrinę sritį – *Lymano kontinuumu*. Tai rejonizacijos „valiuta“: Visata tapo skaidresnė, kai į tarpgalaktinę erdvę pateko pakankamai tokių fotonų, kad vandenilis išliktų jonizuotas.

Tačiau ir pačioje galaktikoje gausu vandenilio. Didelė dalis žvaigždžių pagaminamos jonizuojančios šviesos sugeriama dar prieš jai išeinant iš galaktikos – ji sunaudojama pačios galaktikos dujoms jonizuoti. *Ištrūkimo dalis* yra ta spinduliuotės dalis, kuri iš tiesų pasiekia tarpgalaktinę erdvę ir gali prisidėti prie platesnės Visatos rejonizacijos. Tai esminis skaičius, bet jį sunku matuoti dėl dviejų priežasčių.

Pirma, rejonizacijos metu tarpgalaktinėje terpėje tebėra daug neutralaus vandenilio, kuris sugeria būtent tą šviesą, kurią norime aptikti. Todėl nutekėjusi spinduliuotė paprastai mūsų visai nepasiekia. Antra, net kai dalį jos *galime* matyti – jau po epochos, išskirtinai skaidria regėjimo kryptimi – aptiktą srautą paversti ištrūkimo dalimi reiškia padalyti stebimą kiekį iš to, kiek galaktika iš pradžių pagamino. O šio pradinio kiekio tiesiogiai taip pat nematome. Jį reikia modeliuoti pagal kitą galaktikos šviesą, numanomą žvaigždėdaros istoriją ir žvaigždžių populiacijos prielaidas.

Todėl ištrūkimo dalys turi plačias paklaidas, o kai reikia modeliuoti ir tarpgalaktinę sugertį, tas pats tiesioginis aptikimas gali būti suderinamas su labai plačiu reikšmių intervalu. Skaičius yra rekonstrukcija, o ne tiesioginis prietaiso parodymas.

Ką padarė autoriai

- Galaktikos atstumą jie patvirtino gilia VLT teleskopo MUSE spektroskopija. Spektre aptikta viena emisijos linija – Lymano alfa – su dideliam raudonajam poslinkiui būdingu asimetrišku profiliu, todėl nustatyta z = 4,442. Tikimybę, kad tai atsitiktinis priešakinio objekto sutapimas, autoriai įvertino **0,0076 %**.
- Hubble F435W giliame vaizde aptikta iš galaktikos ištrūkstanti jonizuojanti, Lymano kontinuumo, spinduliuotė. Esant tokiam raudonajam poslinkiui šis filtras mato tik trumpesnių nei 912 angstremų bangų ilgių šviesą, kuri ir laikoma „ištrūkusia“. Signalo statistinis reikšmingumas – **5,2–5,3**σ. Sigma parodo, kiek signalas nutolęs nuo tikėtino triukšmo; 5σ yra labai griežtas statistinis slenkstis, bet savaime neįrodo interpretacijos teisingumo (paaiškinimas). Signalas papildomai palygintas su srautu milijone tuščių dangaus apertūrų, kad būtų atmesta triukšmo versija.
- Tyrėjai kruopščiai atmetė klasikinę tokio tipo rezultatų problemą: galimybę, kad tariamai ištrūkstanti šviesa iš tikrųjų sklinda iš atsitiktinai priešais esančios mažesnio raudonojo poslinkio galaktikos. Tam naudota išspręsta šaltinio morfologija ir specialus silpno kaimyno šviesos atskyrimas.
- Žvaigždžių populiacija modeliuota priderinant visas Hubble ir JWST spalvas (naudojant CIGALE ir kelis žvaigždžių populiacijų modelius). Rezultatai rodo neseną, prieš kelis milijonus metų vykusį intensyvų žvaigždėdaros epizodą.
- Autoriai modeliavo, kiek jonizuojančios šviesos galėjo sugerti tarpgalaktinė terpė per **10 000**

simuliuotų regėjimo krypčių, ir sujungę šiuos duomenis apskaičiavo ištrūkimo dalį.
- Pirmą kartą tokiame dideliame raudonajame poslinkyje jie palygino tiesioginį aptikimą su *netiesioginiu* ištrūkimo požymiu – Lymano alfa linijos forma ir erdviniu išplitimu, vadinamąja „halo dalimi“.

Ką jie nustatė

- Tai iki šiol tolimiausias tiesiogiai aptiktas Lymano kontinuumo šaltinis, z = 4,442.
- Pati ištrūkstanti jonizuojanti šviesa aptikta tiesiogiai – tai ne vien išvada iš kitų požymių, o **5,2–5,3**σ signalas vaizde.
- Apskaičiuota ištrūkimo dalis didelė – maždaug **50–100 %**, priklausomai nuo prielaidų. Tai reikšminga, tačiau nuo modelių priklausanti rekonstrukcija. (Atskiras *santykinis* įvertis gali viršyti 100 %. Tai kyla iš jo apibrėžimo – ištrūkstanti jonizuojanti šviesa lyginama su galaktikos UV srautu prieš pataisant dulkėms – ir nereiškia, kad ištrūksta daugiau šviesos, nei žvaigždės jos pagamina.)
- Žvaigždžių šviesos modeliavimas rodo, kad nesenas žvaigždėdaros protrūkis gali būti atsakingas ir už didelę jonizuojančių fotonų gamybą, ir už jų ištrūkimą.
- Autorių žodžiais, duomenys suteikia **„atsargų palaikymą“** idėjai, kad dideliame raudonajame poslinkyje Lymano alfa linijos forma gali būti ištrūkimo žymuo.

Ko tai neįrodo

- Tyrimas **nenustato „galaktikų, kurios rejonizavo Visatą“**. Čia nagrinėjama viena galaktika, matoma maždaug 250 mln. metų *po* rejonizacijos pabaigos, ne pačios epochos metu. Tai laiptelis link rejonizacijos, o ne jos nuotrauka.
- **50–100 % ištrūkimo dalis nėra tiesioginis matavimas.** Ji gaunama stebimą šviesą dalijant iš *modeliuotos* pagamintos jonizuojančios šviesos ir pataisant pagal *modeliuotą* tarpgalaktinę sugertį. Autoriai taip pat sąmoningai renkasi palankią regėjimo kryptį, nes galaktika, kurios nutekėjusi šviesa apskritai mus pasiekia, neišvengiamai turi būti matoma skaidresne nei vidutine kryptimi. Platus intervalas yra sąžininga šios priklausomybės nuo modelių išraiška.
- Tyrimas **nepatvirtina** naujo Lymano alfa žymens. Vienas objektas, suteikiantis „atsargų palaikymą“, yra pirmas patikrinimas, o ne validacija.
- Jis pats vienas **neįrodo**, kad epizodinė žvaigždėdara buvo pagrindinė rejonizacijos varomoji jėga. Tai pagrįsta interpretacija, paremta viena galaktika ir žymens analize, o ne nustatytas dėsnis.

Kiek tvirti yra įrodymai

- **Stiprūs ten, kur rezultatas tiesioginis:** raudonasis poslinkis (būdingos formos Lymano alfa linija ir tik 0,0076 % priešakinės taršos tikimybė) ir ištrūkstančios šviesos aptikimas (5,2–5,3σ, patikrintas milijone tuščių apertūrų; atsitiktinio priešakinio objekto problema, anksčiau sužlugdžiusi ne vieną didelio raudonojo poslinkio Lymano kontinuumo teiginį, kruopščiai atmesta).
- **Silpnesni – ir autoriai to neslepia – ten, kur reikia modelių:** konkreti ištrūkimo dalies *reikšmė* priklauso nuo žvaigždžių modelių ir pasirinktos tarpgalaktinės regėjimo krypties; reikšmė rejonizacijai remiasi vienu objektu ir interpretacija; naujasis žymuo kol kas patikrintas tik pirmą kartą.
- Darbo atsargumas matomas iš jo intervalų. Autoriai pateikia reikšmių diapazonus, o ne vieną patogų skaičių, naujojo žymens palaikymą vadina „atsargiu“ ir net atsisako pasitikėti vienu savo tarpgalaktinės transmisijos įverčiu. Tai kruopštus straipsnis; perdėjimo rizika daugiausia atsiranda už jo ribų.

Kodėl tai svarbu

Tiesioginius iš galaktikų ištrūkstančios jonizuojančios šviesos aptikimus pavyko nustumti beveik iki pat rejonizacijos epochos – prie ribos, kur tokia šviesa dar vos prasiskverbia. Vien tai vertinga. Tačiau tylesnis rezultatas gali būti dar svarbesnis: *pačios* rejonizacijos viduje tiesioginis metodas nebeveikia, todėl viskas priklauso nuo netiesioginių žymenų, sukalibruotų artimesnėse ir lengviau stebimose galaktikose. Tikrinti vieną iš tokių žymenų ten, kur jį dar galima palyginti su tikru tiesioginiu aptikimu, yra būdas užsitarnauti pasitikėjimą juo vėliau, kai tiesioginis patikrinimas taps neįmanomas. MXDFz4.4 vertė mažiau primena „radome Visatą rejonizavusią galaktiką“ ir labiau – „mokausi atpažinti nutekėjimą ir tikrinu savo metodus dar prieš įžengdamas į tamsą“.

Trumpa santrauka

Naudodami Hubble ir JWST astronomai tiesiogiai aptiko iš vienos z = 4,442 galaktikos ištrūkstančią jonizuojančią ultravioletinę spinduliuotę – tolimiausią tokį aptikimą iki šiol, maždaug 250 mln. metų po kosminės rejonizacijos pabaigos. Pats signalas yra tvirtas. Plačiai cituojama **50–100 %** ištrūkimo dalis nėra tiesiogiai išmatuota – ji rekonstruota iš galaktikos žvaigždžių ir tarpgalaktinės sugerties modelių, pasirinkus palankią regėjimo kryptį, todėl intervalas toks platus. Kartu komanda atliko pirmą tokio didelio raudonojo poslinkio netiesioginio ištrūkimo žymens – Lymano alfa linijos savybių – patikrinimą ir rado tik „atsargų palaikymą“. Tai kruopštus vieno objekto rezultatas: tikras pagautas nutekėjimas, sąžiningai neapibrėžtas jo dydis ir pirmas žingsnis kuriant metodus, kurių reikės, kai pačios nutekančios šviesos nebebus galima matyti.

Be pagražinimų

Ką rodo tyrimas: tiesioginį **5,2–5,3**σ ištrūkstančios jonizuojančios (Lymano kontinuumo) šviesos aptikimą galaktikoje z = 4,442 – didžiausio raudonojo poslinkio tokį aptikimą iki šiol – kruopščiai atmetus priešakinio objekto taršos scenarijų.

Kas tikėtina, bet neįrodyta: kad galaktikos ištrūkimo dalis yra 50–100 %. Pats signalas tikras, tačiau ši dalis rekonstruota per žvaigždžių populiacijos ir tarpgalaktinės sugerties modelius palankia regėjimo kryptimi. Taip pat tikėtina, bet dar nepatvirtinta, kad Lymano alfa linijos forma tokiame dideliame raudonajame poslinkyje veikia kaip ištrūkimo žymuo; vienas objektas suteikia tik „atsargų palaikymą“.

Ko tyrimas nerodo: kad tai galaktika, „rejonizavusi Visatą“ – ji yra po rejonizacijos ir tėra vienas objektas – ar kad epizodinė žvaigždėdara buvo pagrindinė rejonizacijos priežastis. Tai interpretacija, ne demonstracija.

Pagrindiniai ribotumai: vieno objekto imtis; nuo modelių ir sąmoningai skaidrios regėjimo krypties priklausanti ištrūkimo dalis; pirmas ir atsargus naujojo žymens bandymas; didžiulis sunkumas tiriant jonizuojančią šviesą taip arti epochos, kurioje ji mums apskritai tampa nematoma.

Kiek pasitikėti turėtų bendrasis skaitytojas? Tvirtai – kad ištrūkstanti jonizuojanti šviesa tikrai aptikta ir kad tai tolimiausias toks tiesioginis aptikimas. Mažai arba vidutiniškai – tiksliu 50–100 % dydžiu; jį reikia laikyti modeliuotu intervalu, o ne tiesioginiu matavimu. Vidutiniškai – naujuoju žymeniu: daug žadantis pirmas patikrinimas, bet dar ne nusistovėjęs įrankis.

Pakeitimai po publikavimo

- **Pataisa · 2026-07-28**

  Po straipsnio autoriaus Ilias Goovaerts pastabos tekstas nuo pat pradžių aiškiai kalba apie jonizuojančią, o ne ultravioletinę šviesą apskritai: tik trumpesnių nei 912 angstremų bangų UV, žemiau Lymano ribos, yra jonizuojantis, o ilgesnių bangų UV nėra jonizuojantis ir iš didelio raudonojo poslinkio galaktikų stebimas įprastai.

Šaltiniai

Goovaerts et al., arXiv:2603.04517 (accepted in The Astrophysical Journal)
https://arxiv.org/abs/2603.04517

The Astrophysical Journal (2026), DOI 10.3847/1538-4357/ae75b0
https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae75b0